



Durchbruch bei „Nuklearuhr“; ebnet den Weg für äußerst präzises Zeitmessung

Physiker haben alle Bestandteile einer Atomuhr demonstriert, die Zeit anhand winziger Energieverschiebungen im Atomkern misst. Erfahren Sie mehr über die Entwicklung einer nuklearen Uhr mit enormer Präzision und neuen Erkenntnissen in der fundamentalen Physik.



Physiker haben alle Bestandteile einer Atomuhr demonstriert – Geräte, die die Zeit messen, indem sie winzige Energieverschiebungen innerhalb eines atomaren Kerns messen. Solche Uhren könnten zu erheblichen Verbesserungen bei Präzisionsmessungen sowie zu neuen Erkenntnissen in der Grundlagenphysik führen.

Die Forscher maßen die Frequenz des Lichts, das dazu führt, dass die Kerne des seltenen Isotops Thorium-229 in einen höheren Energiezustand übergehen – der „Takt“ der Atomuhr –

mit einer Genauigkeit, die um das 100.000-Fache höher ist als der bisherige Bestwert. Dies gelang ihnen, indem sie die Energiemigration mit dem Takt der präzisesten Uhr der Welt synchronisierten. Die Arbeit wurde von Jun Ye am JILA, einem Forschungsinstitut in Boulder, Colorado, geleitet und am 5. September in Nature veröffentlicht. „Es ist wirklich einer der aufregendsten Artikel der letzten Zeit“, sagt Marianna Safronova, eine Atomphysikerin an der University of Delaware in Newark.

Der Durchbruch kam durch die Untersuchung von Thorium-229-Kernen mit einem Lasergerät namens Frequenzkamm. Das Setup ist technisch gesehen keine Uhr, da es noch nicht zur Zeitmessung verwendet wurde. Aber solche beeindruckenden Ergebnisse machen die Entwicklung einer Atomuhr möglich, sagt Safronova.

Die Messungen des Taktes erweisen sich bereits als nützlich in der Teilchenphysik, sagt Elina Fuchs, eine theoretische Physikerin an der Leibniz Universität Hannover, Deutschland. Und da die Frequenz der Uhr von den fundamentalen Kräften bestimmt wird, die den Kern zusammenhalten, könnte der Prototyp feststellen, ob eine Art von Dunkler Materie – einer unsichtbaren Substanz, die etwa 85% der Materie im Universum ausmacht – diese Kräfte in winzigem Maßstab beeinflusst. „Dies ist ein neues, direktes Fenster zur Kernkraft“, sagt Fuchs.

Ultimative Zeitmesser

Die besten Uhren der Welt, sogenannte Atomuhren, messen die Zeit mit Hilfe von Lasern – die Frequenz des Lichts wird präzise abgestimmt, um die Energie zu erreichen, die nötig ist, um Elektronen zwischen zwei Energieniveaus innerhalb eines Atoms zu bewegen. Die genaueste Atomuhr gewinnt oder verliert nur eine Sekunde alle 40 Milliarden Jahre. Eine Atomuhr würde

etwas anders funktionieren: Der Takt würde den Energieübergängen von Protonen und Neutronen entsprechen, anstelle von Elektronen, wenn sie in einen angeregten Zustand übergehen.

Dieser Energiewechsel erfordert eine leicht höhere, ultraviolette Frequenz, was zu einer schnelleren Taktung führt, die die Genauigkeit der Atomuhr erreichen oder übertreffen könnte. Aber der größte potenzielle Vorteil der Atomuhr liegt in der Kombination von Präzision und Stabilität. Teilchen im Kern sind weniger empfindlich als Elektronen gegenüber Störungen wie elektromagnetischen Feldern – das bedeutet, dass eine Atomuhr tragbar und robust sein könnte. „Es wird auf eine Weise unempfindlich, die in Bezug darauf, wie unsere Uhren heute funktionieren, kaum vorstellbar ist“, sagt Anne Curtis, eine experimentelle Physikerin am National Physical Laboratory in Teddington, Großbritannien.

Aber die Suche nach der richtigen Art von Atomkern zur Verwendung und die Bestimmung der benötigten Frequenz, um ihn in einen anderen Energiezustand zu versetzen, waren für Physiker eine 50 Jahre lange Plackerei. In den 1970er Jahren deuteten indirekte Hinweise darauf hin, dass Thorium-229 einen seltsam niedrigen energetischen Kernübergang hatte – einen, der möglicherweise schließlich durch Tischlaser ausgelöst werden könnte. Aber erst letztes Jahr entdeckten Wissenschaftler die benötigte Frequenz – und in diesem Jahr haben sie den Übergang erfolgreich mit einem Laser initiiert.

Das JILA-Team suchte die Übergangsfrequenz in Billionen von im Kristall eingebetteten Thorium-229-Atomen mit einem System, das als Frequenzkamm bekannt ist. Der Kamm erzeugt eine Reihe von Laserfrequenzlinien mit regelmäßigem und gleichmäßigem Abstand. Dies ermöglicht es den Forschern, den Kristall mit vielen präzisen Frequenzen gleichzeitig zu beleuchten, um nach einem Treffer zu suchen, anstatt mühsam durch das Spektrum der möglichen Optionen mit einem Einzelfrequenzlaser zu scannen.

Die Einstellungen des Kammes – einschließlich der Breite der Lücken zwischen den Linien oder „Zähnen“ – wurden mit der Atomuhr kalibriert und konnten angepasst werden. Das Team führte mehrere experimentelle Durchläufe durch, und als sie den charakteristischen Glanz beobachteten, der entsteht, wenn Thorium-229-Atome aus ihrem angeregten Zustand zerfallen, verwendeten sie die Einstellungen, um die Frequenz zu berechnen, die das Signal steuert.

Das Beobachten des Übergangs zum ersten Mal „fühlte sich erstaunlich an“, sagt Studienmitautor Chuankun Zhang, ein Physiker am JILA. „Wir haben die ganze Nacht lang Tests gemacht, um zu überprüfen, ob dies tatsächlich das Signal war, nach dem wir gesucht haben“, sagt er.

Grundkräfte

Das Besondere am Frequenzkamm ist, dass er es Physikern ermöglicht, den Frequenztakt einer Uhr – hier des Thorium-229-Kerns – als Verhältnis zu einer anderen bekannten Frequenz, in diesem Fall einer Atomuhr, zu messen. Dies ermöglichte es dem Team nicht nur, den absoluten Frequenzwert mit hoher Präzision zu bestimmen, sondern eröffnete auch einige interessante Möglichkeiten in der Physik, sagt Zhang.

Wenn sich die Geschwindigkeit des Takts einer Uhr im Laufe der Zeit im Verhältnis zur anderen ändert, könnte dies darauf hinweisen, dass Faktoren, die die Energieniveaus bestimmen – wie die starke Kern- oder elektromagnetische Kraft – driften oder schwanken, sagt Fuchs. Bestimmte ‚leichte‘ Formen von dunkler Materie, die eine extrem geringe Masse haben, sollen diesen Effekt haben, sagt sie.

Jede Änderung der Kräfte würde in der Frequenz der Kerneinwärtsmigration verstärkt, so dass Atomuhren möglicherweise etwa 100 Millionen Mal empfindlicher auf die Auswirkungen dieser Art von dunkler Materie reagieren könnten als Atomuhren. Das neueste Ergebnis – das die Frequenz mit einer Genauigkeit von 13 Dezimalstellen festlegt – ist bereits präzise genug, um die möglichen Energiebereiche einzugrenzen, in denen leichte dunkle Materie existieren könnte, sagt Fuchs. Die Kernphysik könnte auch von der präziseren

Übergangsfrequenz profitieren, die den Wissenschaftlern helfen könnte, zwischen verschiedenen möglichen Formen des Thorium-229-Kerns zu unterscheiden.

Aber es muss noch mehr Arbeit geleistet werden, bevor Atomuhren die Atomuhren übertreffen können – die derzeit auf 19 Dezimalstellen genau sind. Forscher werden untersuchen, ob es sinnvoll ist, Thorium-229 in einem Kristall eingebettet zu halten – ein Festkörper ist praktisch, um eine tragbare Uhr herzustellen – oder ob das Einsperren einzelner Atome bessere Ergebnisse liefern würde.

Auch das Laser-System muss optimiert werden.

„Glücklicherweise hat diese erstaunliche Technik ein hohes Potenzial“, sagt Olga Kocharovskaya, eine Physikerin an der Texas A&M University in College Station. Es ist ein „Prototyp der Quelle, die in der zukünftigen Uhr verwendet werden soll“, fügt sie hinzu.

1. Zhang, C. *et al. Nature*
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07839-6> (2024).

Artikel

Google Scholar

2. Kroger, L. A. & Reich, C. W. *Nucl. Phys. A* **259**, 29–60 (1976).

Artikel

Google Scholar

3. Kraemer, S. *et al. Nature* **617**, 706–710 (2023).

Artikel

PubMed

Google Scholar

4. Elwell, R. *et al. Phys. Rev. Lett.* **133**, 013201 (2024).

Artikel

PubMed

Google Scholar

Referenzen herunterladen

Besuchen Sie uns auf: natur.wiki